

в результате отдачи. Облучение заряж. частицами (электронами, позитронами, протонами, ионами) сопровождается как неупругой (передача энергии электрона), так и упругой передачей энергии атомам мишени. Соответственно образованию Р. д. при таких воздействиях протекает по механизмам, характерным для облучения как нейтронами, так и эл.-магн. квантами.

Образование Р. д. при передаче энергии электронам возможно гл. обр. в диэлектриках и полупроводниках. В металлах энергия, «растроченная» радиацией на возбуждение атомарных электронов, преим. превращается в тепло, не создавая дефектов структуры.

Если энергия, к-рой обладает первичный смещённый в междоузелье атом, значительно превосходит $\epsilon_{\text{п}}$, такой атом в свою очередь может при движении генерировать пары Френкеля вблизи своей траектории и т. д. Результатом каскада соударений является образование дефектных разупорядоченных областей — радиационных кластеров с характерным линейным размером $\sim 10^{-6} - 10^{-5}$ см. При этом концентрация компонентов пар Френкеля в кластере может достигать $10^{21} - 10^{22}$ см $^{-3}$. При ионной имплантации (энергия ионов $\sim 10^2$ кэВ) локализация кластеров в тонких слоях, определяемых пробегом ионов ($\sim 10^{-4}$ см), ведёт к образованию слоёв с большей концентрацией дефектов (см. Ионная бомбардировка).

Во мн. случаях образование пар Френкеля и кластеров является лишь первой стадией формирования устойчивых Р. д. После возникновения вакансии и междоузельные атомы частично рекомбинируют, частично начинают движение по мишени, вступая в т. н. квазихим. реакции друг с другом и с др. дефектами структуры мишени (примесными атомами, дислокациями или границами раздела фаз).

Типы и концентрации устойчивых Р. д. определяются как условиями облучения, так и свойствами самих твёрдых тел. При этом для лёгких частиц и фотонов не слишком высоких энергий наиб. характерно образование устойчивых точечных дефектов (изолиров. вакансий или междоузельные атомы, дивакансии, комплексы компонентов пары Френкеля с примесными атомами и т. п.). При облучении нейтронами устойчивый кластер представляет собой дивакансионное ядро, окружённое примесно-дефектными комплексами. При ионной бомбардировке плотность точечных дефектов в кластере больше, чем при нейтронной, и она тем выше, чем больше масса иона. При этом важную роль в формировании устойчивых кластеров играет процесс пространственного разделения вакансий и междоузельных атомов, предшествующий стадиям квазихим. реакций. В силу этого устойчивые кластеры, возникающие при ионной бомбардировке, имеют более сложную структуру и состоят из дивакансионных комплексов с разл. числом вакансий, примесно-дефектных комплексов, а также атомов внедрённой примеси. При облучении кристаллов тяжёлыми ионами устойчивые кластеры представляют собой локальные аморфные области.

Р. д. — метастабильные образования, их концентрацию и природу можно изменить нагревом (термич. отжиг дефектов). Такая термообработка иногда может сопровождаться полным восстановлением исходной структуры. В то же время в зависимости от условий отжига (темпера, скорость её изменения, время, газовая среда, характер возбуждения электронной системы атомов и дефектов) квазихим. реакции могут сопровождаться появлением новых типов дефектов. Напр., типичный для технологии микроэлектроники отжиг бездислокационного Si, имплантированного большими дозами ионов Р, сопровождается образованием дислокаций, плотность к-рых особенно высока, если нагрев осуществляется в окислит. атмосфере. При термич. отжиге Р. д. приобретают энергию, достаточную для разрыва связи между ними, миграции освобождёвшихся частиц и протекания реакций с их участием.

В качестве источника энергии при отжиге иногда может служить облучение (радиационный отжиг). При этом механизмы радиационного отжига могут быть обусловлены как повышением темп-ры мишени (радиационный разогрев), так и реакциями взаимодействия рождающихся компонентов пар Френкеля с ранее образовавшимися Р. д. Примером радиационного отжига является стимулированная ионами кристаллизация, благодаря к-рой аморфный слой, образующийся в кристаллич. полупроводниках в результате ионной бомбардировки, вновь кристаллизуется при продолжении облучения.

Взаимодействие излучений с твёрдым телом сопровождается рядом т. н. радиационных эффектов. В их числе: распыление; изменение коэф. диффузии; удаление атомов с облучаемой поверхности; т. н. трансмутация, легирование (образование примесных атомов в результате ядерных реакций); ионный синтез (хим. реакции, приводящие к образованию новых соединений, в имплантированных химически активными ионами объектах в процессе облучения или последующего отжига).

Генерация Р. д. в твердотельных материалах сопровождается изменением их свойств. Так изменяются форма и размеры облучённых образцов (радиационная набухание), причём анизотропный характер этих изменений зависит как от концентрации, так и от конфигурации Р. д. Изменяются механич. свойства твёрдых тел, что проявляется в увеличении предела текучести пластичных материалов, некоем повышении модуля упругости, ускорении ползучести. Накопление Р. д. изменяет степень упорядоченности структуры сплавов и ускоряет фазовые переходы. Электропроводность облучённых тел изменяется прежде всего из-за появления заряж. дефектов. Особенно сильно это проявляется в полупроводниках, где Р. д. не только выступают как центры рассеяния носителей заряда, но способны изменить концентрацию и природу осн. носителей заряда. Нейтральные дефекты также влияют на проводимость, т. к. являются центрами рассеяния носителей. Для оптич. свойств характерно появление новых областей поглощения в разл. спектральных областях (см. Центры окраски). Специфически влияет облучение на поверхность твёрдых тел, не только вызывая образование новых, не свойственных объёму дефектных структур, но и изменяя физ.-хим. свойства поверхности (напр., кинетику окисления и адсорбции).

Иницированные Р. д. изменения свойств материалов нередко затрудняют их практич. использование. Так, изменение механич. свойств, однородности состава и геом. размеров конструкц. элементов ограничивает срок работы ядерных реакторов. Особенно сильно влияет радиация на полупроводниковые материалы и приборы. В силу высокой чувствительности электрич. характеристик полупроводников к появлению малой концентрации Р. д. облучение полупроводников даже при низких дозах радиации может сопровождаться существенными изменениями параметров полупроводниковых приборов.

В то же время образование Р. д. в твёрдых телах, особенно в сочетании с др. воздействиями (с изменением темп-ры, механич. нагрузки, электрич. поля, освещения), позволяет направленно регулировать свойства твердотельных материалов.

Примерами применений радиационно-технол. процессов, осн. на использовании свойств Р. д., являются повышение коррозионной стойкости металлов под влиянием ионной имплантации, деформация, упрочнение облучённых ионных кристаллов, ускоренная полимеризация пластмасс, нейтронное трансмутация, легирование Si и др. Совокупность методов для создания материалов, устойчивых к облучению, а также для придания материалам нужных свойств под действием облучения составляют предмет радиационной материаловедения.

Лит.: Келли Б., Радиационное повреждение твердых тел, пер. с англ., М., 1970; Физические процессы в облученных полупроводниках, под ред. Л. С. Смирнова, Новосибир., 1977. В. Н. Мордович.